

Компьютерное моделирование траекторий движения капли воды при охлаждении шлакового поля

Д.С. Прокопьева

Научный руководитель - Н.Н. Сеницын, доктор технических наук, профессор.

Череповецкий государственный университет

При проектировании сложной оросительной системы возникает задача размещения распылителей таким образом, чтобы добиться максимальной эффективности их работы. При необходимости обеспечения равномерного орошения какой-либо поверхности, максимальная равномерность будет достигаться при выполнении следующих условий: вся заданная поверхность смачивается жидкостью, т.е. перекрывается факелами; взаимное наложение факелов на уровне орошаемой поверхности минимально; количество жидкости, выпадающее на орошаемую поверхность минимально.

Эти условия соответствуют минимальному значению коэффициента избыточного орошения ξ , представляющего отношение суммарной площади факелов всех распылителей S_ϕ к площади орошаемой поверхности S_{op} [1]:

$$\xi = \frac{S_\phi}{S_{op}}.$$

Независимо от типа распылителей решение будет определяться формой орошаемой поверхности. По этому признаку все известные варианты можно свести к трем: кольцевое сечение, круглое и прямоугольное.

Для орошения площадей больших размеров, независимо от формы площади, возможны два простых способа расстановки распылителей: в узлах прямоугольной сетки со сторонами $a = 2r_\phi \cos\varphi$; $b = 2r_\phi \sin\varphi$ и в вершинах равнобедренных треугольников с основанием $d = 2r_\phi \sin\varphi$ и высотой $h = 2r_\phi \cos^2\left(\frac{\varphi}{2}\right)$ (рис.1 [1]).

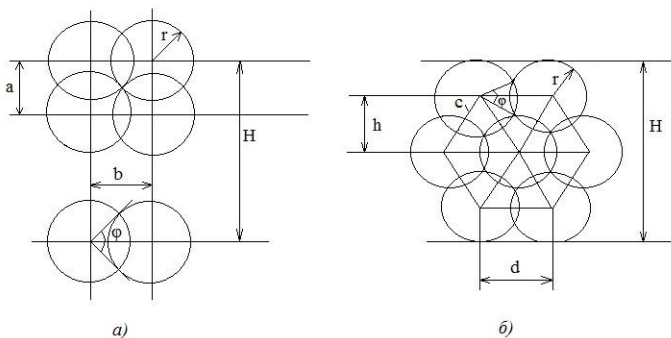


Рис.1 Расчетные схемы размещения распылителей для образования совокупного факела. а) прямоугольная расстановка; б) шахматная расстановка.

В первом случае $\xi_{\text{пр}} = \frac{\pi}{4 \sin \varphi \cdot \cos \varphi}$ будет минимальной при $\varphi = \frac{\pi}{4}$ ($\xi_{\text{пр}}^{\text{min}} = 1,57$), когда сетка превращается в квадратную. Во втором случае, где $\xi_{\text{кос}} = \frac{\pi}{2 \sin \varphi + \sin 2\varphi}$. Эта функция имеет минимум при $\varphi = \frac{\pi}{3}$ и равна 1,21.

Из сравнения видно, что при косоугольной расстановке доля однократно орошаемой поверхности выше. При таком размещении $b = c = r_{\phi} \sqrt{3}$; $h = \frac{3}{2} r_{\phi}$, т.е. распылитель устанавливают в вершинах равносторонних треугольников; такую расстановку называют шахматной.

В обоих случаях связь размера сечения площади орошения (пусть это ширина сечения H) с радиусом факела имеет вид:

$$H = (N - 1)h + 2r_{\phi},$$

где N – число рядов распылителей, r_{ϕ} – радиус факела.

Процесс распыления, независимо от конструктивной схемы форсунки, состоит из следующих фаз: течение жидкости в струе, течение в пленке по поверхности отражателя, срывы пленки с этой поверхности и распада ее на капли.

Для практических целей интересна толщина пленки и средняя скорость течения жидкости в ней на внешней кромке отражателя, которые определяют дисперсность распыливания и гидродинамику факела. В зависимости от размеров сопла, скорости истечения струи и размеров отражателя кромка последнего может оказаться в любой из зон вязкого течения: потенциального течения и вязкого течения.

Толщину пленки в области $R_{\text{см}} < R < R_{\text{г.п.}}$ можно определить из условия постоянства расхода:

$$S_{\text{п.п.}} = \frac{G_{\text{ж}}}{2\pi R_{\text{см}} w R_{\text{ср}}}.$$

Размер образующихся капель для форсунок со сплошным отражателем можно определить по эмпирическому уравнению, полученному в работе [1]:

$$\frac{d_{32}}{d_c} = 4,71 \cdot 10^{-2} Ga^{-0,59} \cdot Fr^{-0,5}$$

Здесь $Ga = \frac{g \cdot d_c^3 \cdot \rho_{\text{ж}}^2}{\mu_{\text{ж}}^2}$ - критерий Галилея; $Fr = \frac{w^2}{g d_c}$ - критерий Фруда; g - ускорение свободного падения; d_c - диаметр сопла; $\rho_{\text{ж}}$ - плотность жидкости; $\mu_{\text{ж}}$ - динамический коэффициент вязкости жидкости; $G_{\text{ж}}$ - массовый расход жидкости; $R_{\text{см}}$, R , $R_{\text{г.п.}}$ - радиус смыкания, текущий радиус и радиус области гидравлического прыжка; $w R_{\text{ср}}$ - средняя скорость течения пленки; d_{32} - объемно-поверхностный диаметр капли.

Движение капель в газовом потоке описывается уравнением движения частиц переменной массы В.М.Мещерского [2]:

$$m \frac{d\vec{V}}{d\tau} = \sum_{i=1}^k \vec{P}_i, ,$$

где $\sum_{i=1}^k \vec{P}_i$ - сумма всех сил, действующих на каплю в газовом потоке; $m = \frac{\pi \delta^3 \rho}{6}$ - масса капли, изменяющаяся во времени; $m = m(\tau)$; δ - начальный диаметр капли; ρ - плотность воды; \vec{V} - скорость движения капли; τ - время.

На каплю, движущуюся в газовом потоке, действует сила аэродинамического сопротивления \vec{P}_c и сила тяжести \vec{P}_B :

$$\vec{P}_c = \frac{1}{2} c_m f \rho_{\text{г}} (\vec{W} - \vec{V}) |\vec{W} - \vec{V}|;$$

$$\vec{P}_B = \vec{g} m ,$$

где c_m - коэффициент аэродинамического сопротивления капли; $f = \frac{\pi \delta^2}{4}$ - площадь миделева сечения частицы (капли); $\rho_{\text{г}}$ - плотность газового потока; \vec{V}, \vec{W} - соответственно скорости движения капли и газового потока; \vec{g} - вектор ускорения свободного падения (рис.2).

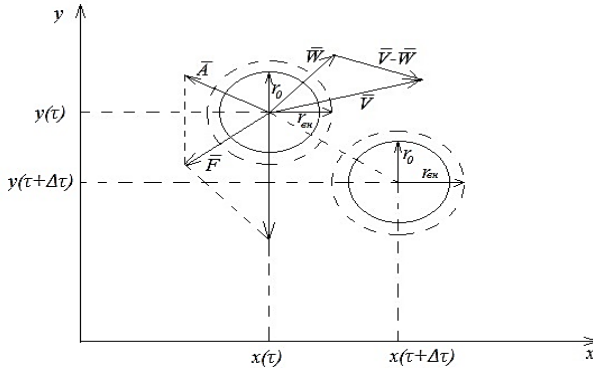


Рис.2 Схема к расчету траектории движения капли воды в газовом потоке.

r_0 - радиус капли; \vec{W}, \vec{V} - векторы скоростей газа и капли; $\vec{A}, \vec{P}, \vec{F}$ - силы аэродинамического сопротивления, тяжести и инерции соответственно; τ - время; $r_{пл}$ - внешний радиус приведенной пленки.

Движение одиночной капли воды в проекциях в двухмерной системе координат задается уравнениями:

$$\begin{cases} m \frac{dV_x}{d\tau} = \frac{c_m f \rho_{\Gamma}}{2} (W_x - V_x) \sqrt{(W_x - V_x)^2 + (W_y - V_y)^2} \\ m \frac{dV_y}{d\tau} = \frac{c_m f \rho_{\Gamma}}{2} (W_y - V_y) \sqrt{(W_x - V_x)^2 + (W_y - V_y)^2} - mg \end{cases} \quad (1)$$

где V_x, V_y - проекции скорости движения капли; W_x, W_y - проекции скорости движения газового потока; $c_m = f(Re)$ - коэффициент аэродинамического сопротивления капли, определяемый в зависимости от значения критерия Рейнольдса:

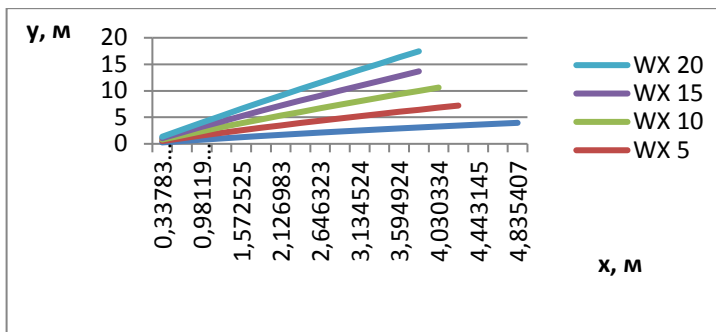
при $Re < 1$ (область Стокса) $c_m = \frac{24}{Re}$;

при $1 \leq Re \leq 10^3$ (переходная область) $c_m = \frac{24}{Re} + \frac{4}{\sqrt[3]{Re}}$ - (формула Шелла-Клячко);

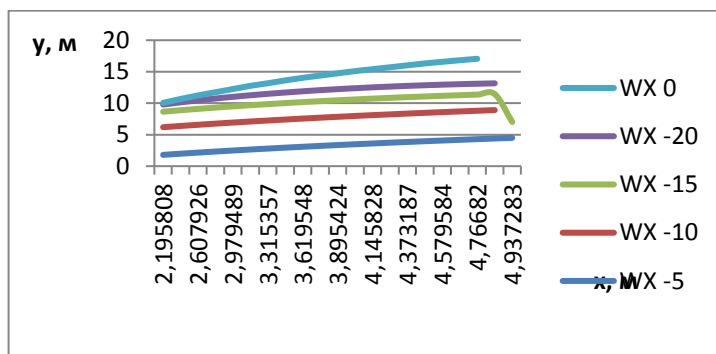
при $2 \cdot 10^4 \leq Re \leq 2 \cdot 10^5$ (автомодельная область) $c_m = 0,48$;

при $Re > 2 \cdot 10^6$ (закритическая область) $c_m = 0,2$.

На рис.3 (а, б) показаны траектории движения капли диаметром 2 мм в попутном потоке и во встречном потоке воздуха. Скорость потока воздуха изменяется от 0 до 20 м/с. Максимальное отклонение от вертикальной оси (оси форсунки) при попутном потоке увеличивается на 25%.



а)



б)

Рис.3 Расчет траектории движения капель воды в попутном потоке а); и во встречном потоке б).

Траектории капель воды в потоке газа позволяют спрогнозировать площадь орошения поверхности в зависимости от влияния скорости ветра на промышленной установке.

Таким образом, предложена математическая модель расчета траектории движения капель воды в газовом потоке, с учетом влияния массы капель, начальной скорости вылета капли, угла вылета и скорости ветра.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пажжи Д.Г., Галустов В.С. Основы техники распыливания жидкостей. – М.: Химия, 1984. 254с.
2. Полеводова Л.А. Расчет траекторий движения капли воды с учетом фазовых переходов в системе газоочистки кислородного конвертера. / Н.Н.Синицын, Л.А.Полеводова. // Вестник Воронежского государственного технического университета. – Воронеж, ВГТУ-2007.-т.3-№6-С.160-164.